

技術論文

油圧ショベル転倒時運転者保護構造キャブのシミュレーション紹介 Introducing a Simulation of a Cab Protecting the Operator during the Rolling over of a Hydraulic Excavator

山 縣 研 一
Kenichi Yamagata
津 村 大 介
Daisuke Tsumura

現在、他の建設機械同様に油圧ショベルにも転倒時の乗員保護のための機能を備えたキャブについての安全規制が制定されつつある。このキャブを開発するにあたり、これまでの品質確認試験に加えて新たなテストが加わることになる。本稿では、この新たな品質確認試験をコンピューター上でシミュレートする手法を紹介する。

Safety regulations are now also being enforced on hydraulic excavators; regulating cabs that have functions to protect the operator during tipping, as is currently required for other construction machinery. During the development of these cabs, new tests are conducted in addition to the quality verification tests previously required. This report describes a technique to simulate these new quality verification tests using a computer.

Key Words: ROPS, EOPS, CAE, 安全基準 (Safety Standards), PAM-CRASH

1. はじめに

1.1 背景

自動車等とは異なり、油圧ショベルは低速での移動しかできないため、走行時での衝突時の乗員の安全性に対してはさほど注意が払われてはいなかった。しかし、油圧ショベルの事故事例によると、むしろ「自機が横転した」「崖のような作業エリアから転がり落ちた」(図1)が何件か発生している。「油圧ショベルの転倒時保護構造キャブに関する安全規制」についてはISOでは現在検討中であるが、JCMASでは2003年3月に既に制定されており、コマツでもそれらの規制に対応した開発を行ってきた。本稿では、この転倒時乗員保護構造キャブをコンピューター上でシミュレーション(以降、「解析」と称する)を行う手法について紹介する。



図1 転倒時の油圧ショベル

1.2 開発時の解析の必要性

転倒時保護構造機能を備えたキャブを開発するにあたって、コンピューター上での解析の必要性がより一層高まった。その背景として、下記のような課題がある。

(1) 開発期間の短縮要求と開発費の低減(試験のやり直し回数の削減)

開発期間の短縮のための試験のやり直し回数の削減は避けては通れない課題である。しかし、強度の確認試験の性質上、一度品質確認試験に使用したキャブは再利用不可能となる(修復不能)。それゆえ試験に不合格となることは、かなりの時間をロスしてしまう(図2)。



図2 品質確認試験後のキャブ

(2) 試験用キャブ製作納期の問題

一度品質確認試験でNG判定となった後、補強対策をして再度試験用キャブを製作するが、対策図面をキャブメーカーに渡してから、納入されるまで長い日数を必要とする。

(3) 手計算の精度の問題

このキャブと押し治具、作業機等が衝突した状態を想定して衝突部の変形量を設計するのだが、手計算では完全弾性体による静的荷重を基準に衝撃荷重時の変形量を算出するようなやり方しかないため、実測値とは一致しにくく、経験則的に設計していた。このため、実機による品質確認試験を実施するまではどの程度の強度レベルなのか把握できず、最悪、実機にて繰り返し試験をすることになり、費用・工数の面でロスが大きくなる。

以上3項目に代表される理由により、塑性変形、座屈変形、接触を考慮したコンピューター上の解析を実施した。

2. 転倒時運転者保護構造キャブに対する要求品質

2006年12月現在、油圧ショベル用の安全基準、強度判定の方法はISOでは未制定である。そこで本稿ではJCMAS(H018:2003)での強度評価方法を紹介する。

2.1 横押し条件(図3)

キャブの左上のピラー部に押し治具を押し付け、車体左から車体右方向へ荷重を加える。荷重によりキャブが塑性変形を起こしエネルギーを吸収する。目標とする「側方負荷エネルギー:Es」(注1)を達成した時点で押し治具を止め、荷重を取り除く。側方負荷エネルギー達成までに変形したキャブが人間の生存空間(Deflection Limiting Volume:以降DLVと呼称)に侵入すると不合格である。

(注1) 側方負荷エネルギーEs(単位:J)

$$Es = 13000 \times (M / 10000)^{1.25} \text{ [J]}$$
 (M:試験機械の運転質量:[単位:Kg])

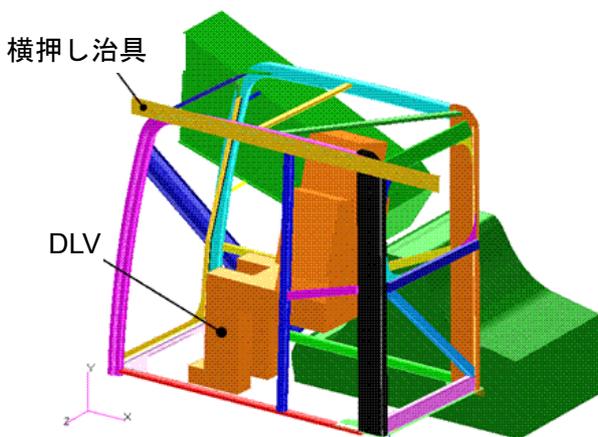


図3 横押し条件

2.2 上押し条件(図4)

2.1の横押し終了後の形状(塑性変形している)を引き継ぐ。キャブ全体を覆う大きな治具で車体上方から車体下方へ荷重を加える。目標とする「垂直負荷荷重:Lv」(注2)を達成した時点で押し治具を止める。目標荷重達成までに変形したキャブがDLVに侵入すると不合格である。

(注2) 垂直負荷荷重Lv(単位:N)

$$Lv = 9.8M \text{ [N]}$$
 (M:試験機械の運転質量:[単位:Kg])

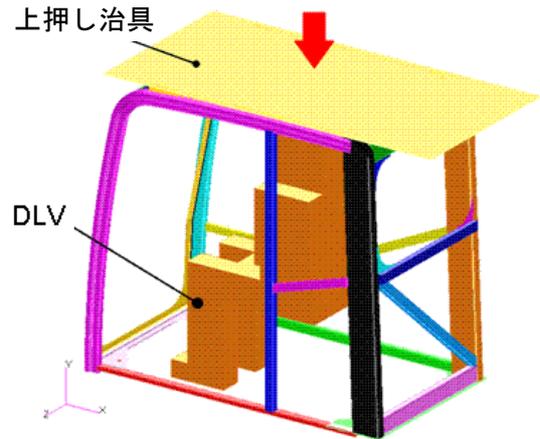


図4 上押し条件

JCMASでは上記2.1, 2.2の条件を満足するものを油圧ショベル用転倒時保護構造キャブとして定義する。

2.3 荷重とエネルギー

前述したとおり、品質要求の基準には「荷重」「エネルギー」の2つの項目が存在する。これについて簡潔に説明する。

荷重: 押し治具でキャブに力を加えているとき、キャブから押し返される力の最大値

エネルギー:「荷重」を「押し治具の変位」で積分したものの(図5参照)。

どちらの項目も塑性変形の形状、進行度合により左右される。そのため、最終的には実機を作成して試験を行い、品質を確認することが必須である。

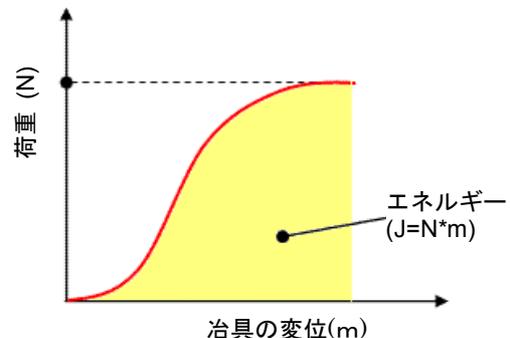


図5 荷重とエネルギー

3. 解析用ソフトの選定

開発当初の検討では、弊社で使用実績のある解析ソフト「MSC Nastran」を使用した。しかし、開発がすすむにつれて、解析結果と実機での試験結果に大きな乖離が見られるようになった。

3.1 Nastran での限界

最も大きな乖離が座屈の有無である。実機では品質確認試験時に図6で示す個所に座屈が発生したのに対し、解析結果ではそのような兆候は表れなかった。それゆえ、座屈が発生したあたりから、治具のストロークとキャブが受ける荷重の関係が乖離し始め(図6)、最終的には全く異なる結果となり、とても実務に活用できる状態ではなかった。

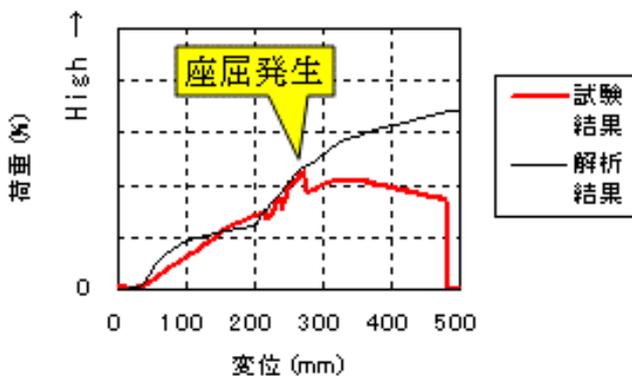


図6 Nastran 解析と試験結果との比較

3.2 PAM-CRASH への変更

「Nastran」では座屈、かつ大変形を生じる油圧ショベルのキャブの様な弾塑性解析は困難と判断し、別のソフトウェア「PAM-CRASH」で解析を再度やり直した。「PAM-CRASH」は大規模な弾塑性変形・破断を生じる解析を得意とするソフトウェアであり、他の解析に使用した実績もある(詳細はKOMATSU TECHNICAL REPORT 2003 VOL.49 No.151「落下物保護構造物(FOPS)のシミュレーションの紹介」を参照)。

4. 適用例

4.1 解析対象

中型油圧ショベルの転倒時運転者保護構造機能を持ったキャブを対象とする。キャブは強度メンバーとして機能するものだけで構成されるもの(ホワイトボディ)のみとし、外装パネル等は作成しない。

4.2 解析モデル

解析モデルは形状を3D-CADデータから流用し、各部材の構成要素は「シェル」で作成する。シェルは厚さや材料特性をデータとして持つ要素であり、モデルの容量を抑えることができる。

評価するキャブ以外の周辺の部品もモデル化する。治具で押されて変形したキャブが他の装置(レボフレーム、作業機、シリンダ等)に接触し、発生する荷重や、ひずみエネルギーに影響を及ぼすことも考慮に入れなければならない。そのため、解析中にキャブと接触するであろうと推測されるものはあらかじめ作成しておく必要がある(図7)。

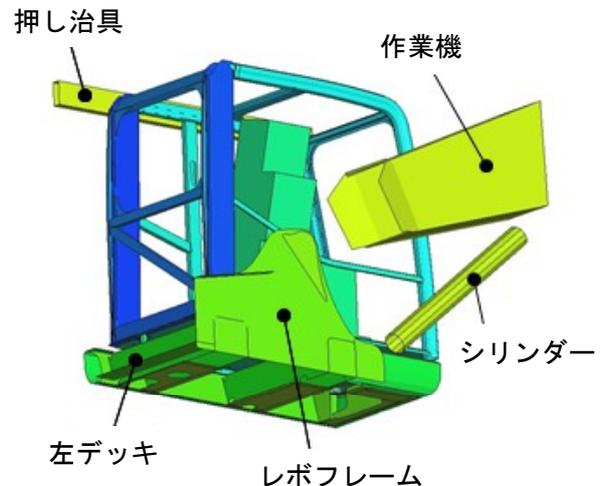


図7 解析モデル

4.3 荷重

2.1, 2.2で説明した横押し、上押し条件ともに押し治具をキャブに押し当てて荷重を加え、変形、歪みエネルギーを発生させることをシミュレートする。このとき注意しなければならない点として、下記の項目がある。

(1) 衝突エネルギーを発生させない

治具とキャブの接触時に衝突による大変形が発生しないようにあらかじめ治具をギリギリまでキャブに近づけておき、治具の移動速度もキャブに接触してから、徐々に増加させる。

(2) 運動エネルギーのチェック

実機を用いた試験と同じ治具速度、同じ質量密度でキャブを押すシミュレーションを行うと、解析時間が非現実なものとなる(横押しのみで数ヶ月)。そこで、治具速度の増加に加えて、マススケーリングと呼ばれる質量密度を増加させて計算時間を短縮させる手法を用いる。このとき、治具の運動エネルギーがキャブの歪みエネルギーに比べて十分小さくなるよう(準静解析)に治具速度、質量密度を調整する(図8)。

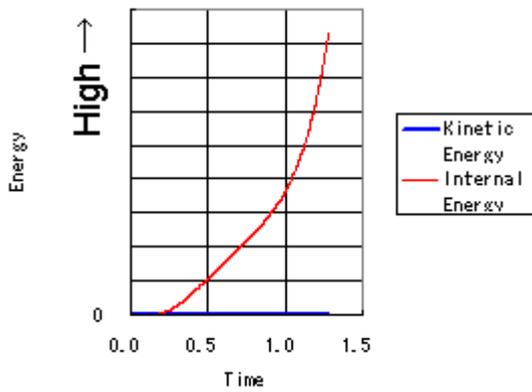


図8 エネルギーと時間線図

4.4 解析結果

以下に解析結果と実機を用いたベンチで行った試験結果（以降「ベンチ結果」と称する）との比較を示す。今回は中型油圧ショベル開発機について説明する。

解析当初の結果は、キャブの変形がベンチ結果と大きく異なったため（図9）、解析モデルのパラメータを修正して再度解析を行った。



ベンチ結果

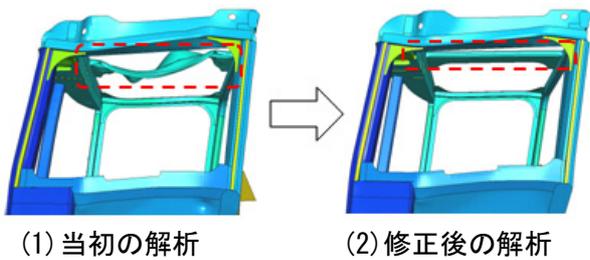


図9 変形の比較

(1) 当初の解析

[横押し条件]

ベンチ結果に比べて解析結果の荷重のピークが20%程度高くなった（図10, a 参照）。吸収エネルギーが目標値に達したときに右 A ピラーがベンチテストでは作業機と接触しなかったが、解析では接触してしまったのが原因と考えられる（図11）。

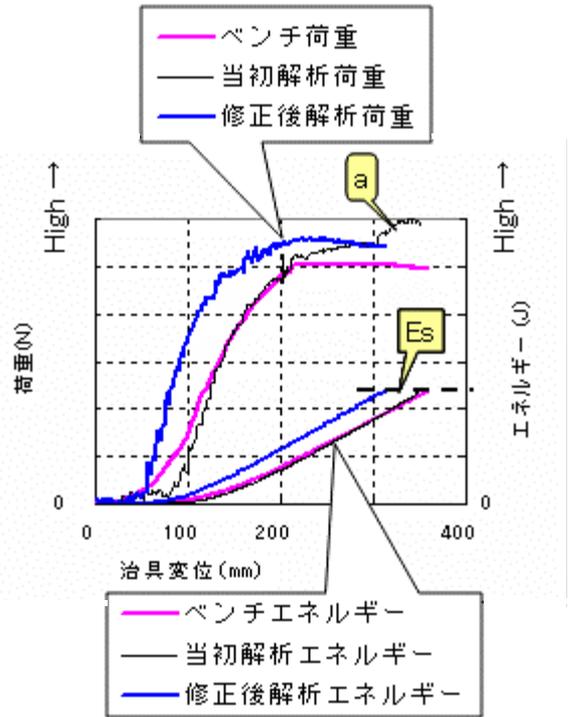


図10 横押し条件比較

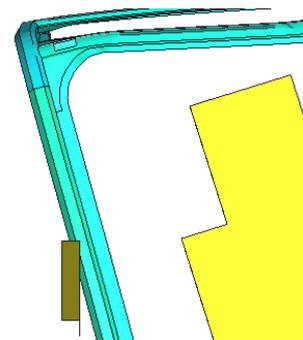


図11 横押し時に作業機と接触

[上押し条件]

ベンチ結果、解析結果とも目標荷重を達成した。しかし、達成時の治具の変位はベンチ結果に比べて解析結果の方が 26%程度多くなり、目標荷重達成後の形状もベンチ試験後の形状とは異なる結果となった。

4.5 モデル化の見直し

ベンチ結果と解析結果との乖離を解消すべく解析モデルに以下の変更を加えた。

(1) キャブ-レボフレーム間のすきまの修正

キャブ-レボフレーム間のすきまをベンチテストと同じ寸法に修正する。設計の作成した3D-CADの情報から、解析モデルをシェルで形状を簡素化する際にミスを犯したものと考えられる(図12)。

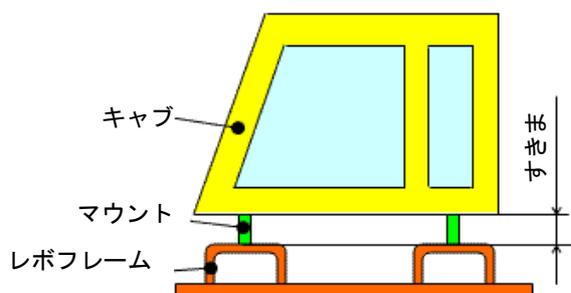


図12 キャブ-レボフレーム間のすきま修正

(2) レボのパッチ追加

実機はレボフレームの左メインビームにパッチが溶接されており、ベンチテスト時にそれがキャブの右リアと接触していた。これは当初想定しておらず、横押し上押し条件とも何らかの影響を与えていると思われるので修正した(図13)。

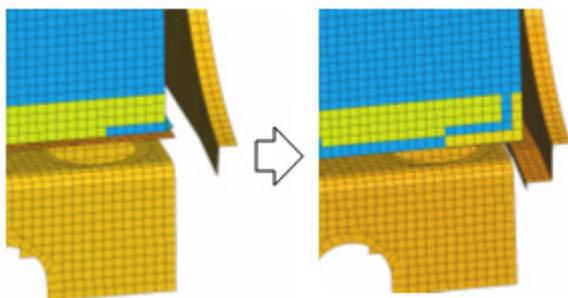


図13 解析モデルにパッチ追加

(3) 減衰追加

今回の解析は準静的であり、治具が押し続ける時間が長く、解析時間短縮のためにマススケーリングを用いている。そのため、通常は影響のないノイズのような振動成分が増幅され、不自然な挙動(目標エネルギー達成後、押し治具からの荷重が0になっても変形が続く)が発生していた。その対策として、減衰比 $\gamma=0.1$ というパラメータをシェルの材料情報に加えた。

4.6 モデルを修正した結果

4.5 で述べた見直し内容を織り込み再度解析を行った。その結果を下記に示す。

横押し条件時(図10, a)の荷重の異常増加(キャブと作業機との接触)は解消された。

上押し条件はキャブの変形そのものは、当初の解析よりもベンチ結果に近くなったが、目標達成時の治具変位量は当初解析よりも乖離し、ベンチ結果よりも「甘め」になってしまった。

上押し荷重は横押し後の変形を引き継いで解析を行う。そのため上押し条件キャブの中心線の根元にかかるモーメント(M_0)は横押し後の形状に影響され、数値が変化する。そのため横押し条件よりも再現は困難である(図14)。

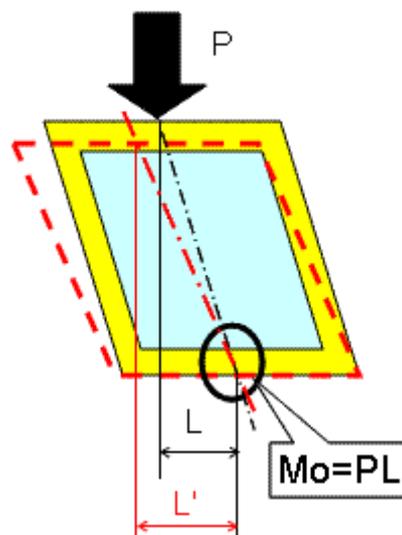


図14 上押し時、キャブにかかるモーメント

5. 解析結果の活用

解析結果を設計にフィードバックするにあたり、設計者が判断することとして、以下のことが挙げられる。

(1) 破断の恐れのある個所の確認

ベンチ試験時で塑性変形中のキャブに破断が生じると剛性バランスが崩れ、荷重が一気に減少するので注意が必要である。破断個所の予測は解析データの応力値とひずみをチェックし、ある値以下であれば破断しないと判断する。

(2) 破断が予想される個所がある場合

破断部位の設計を変更し、同時に解析モデルも修正、再計算を行う。破断が発生しないようになるまで設計を変更する。

6. 今後の課題

現状の解析には以下の問題があり、今後もそれらを改善すべく活動していきたい。

(1) 現状の解析では降伏、塑性、座屈までしか考慮していないので「破断」までは再現しきれていない。

(2) 横押し、上押し条件の両方とも解析結果がベンチ結果よりも「甘め」になるので、コスト低減と強度確保の

最適化を限界まで突き詰める設計に活用する場合は注意が必要である。

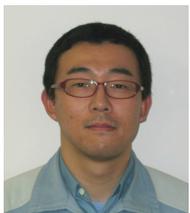
(3) 解析モデル作成から解析結果が出るまでのリードタイムが長い。3D-CAD データから解析用のシェルモデルを作成する工程がボトルネックとなっている。

筆者紹介



Kenichi Yamagata

やま がた けん いち
山 縣 研 一 1998 年、コマツ入社。
現在、開発本部 建機第一開発センタ所属。



Daisuke Tsumura

つ む ら だい す け
津 村 大 介 1998 年、コマツ入社。
現在、開発本部 キャブ開発センタ所属。

【筆者からのひと言】

解析の精度も重要であるが、解析リードタイムの短縮の必要性を特に今回は痛感した。品質確認の性質上、手計算で評価するのは事実上困難な上に、設計品がいわゆる「型もの」であるがため、「とにかく早めに解析結果が欲しい」設計者をずいぶんヤキモキさせてしまった。今後、この部分もあわせて改善したい。

【注記】

「PAM-CRASH」は PAM System International S.A の登録商標です。
「MSC Nastran」は MSC Software Corporation の登録商標です。